



Predictive equations for fundamental period of steel moment frames considering the effects of irregularity in the floor plan and height and soil-structure interaction

M. J. Hamidia*, F. Nejabati

Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Robust estimation of the fundamental elastic period of the buildings is essential for obtaining realistic seismic base shear. Seismic design codes provide a variety of equations to calculate the fundamental elastic period of vibration for steel moment frame buildings. The empirical equations are mainly based on the building height and do not take into account the effects of irregularity and soil-structure interaction. In this paper, an empirical predictive equation is developed to estimate the fundamental elastic period of steel moment frames. The predictive equation includes parameters that represent irregularity effects and soil-structure interaction. The database used in this study consists of architectural and geotechnical data for 45 building cases. The proposed predictive equation shows satisfactory accuracy. The predicted results are then compared to the values obtained from Iranian 2800 seismic design code, ASCE7-16 and UBC-97. The proposed predictive equation is also verified by 10 fundamental elastic periods obtained from analytical models. The fundamental elastic period was derived using the predictive equations that are specifically more accurate for mid- and high-rise buildings compared to seismic design codes. The values obtained from seismic codes are well below the realistic values for the buildings.

Review History:

Received: Aug. 17, 2021

Revised: Oct. 13, 2021

Accepted: Nov, 19, 2021

Available Online: Dec. 02, 2021

Keywords:

Predictive equation

Fundamental elastic period

steel moment frames

Irregularity

Soil-structure interaction, 2800 seismic design code

1- Introduction

Earthquake is one of the risks that can cause irreparable loss of life and property. The response of any structure in the elastic state relies solely on the fundamental period and damping ratio of the structure. In the nonlinear regime also, the fundamental period of the structure is one of the most important parameters in the quantification of the seismic response of structures; In the initial analysis stage for seismic design, it is necessary to accurately estimate the fundamental period of vibration of the building in order to calculate the base shear force. The equation stated in the Earthquake Design Regulations (2800) [1] to calculate the fundamental period of buildings is obtained by modification to the equations of various regulations such as UBC [2]. In the equation presented in Iranian Standard 2800 (Fourth Edition), among the structural specifications, only the height of the building is considered, which can reduce the accuracy of the recent equation because, for two buildings of the same height with different dimensions in the plan and different heights and conditions of the building soil, they yield an identical fundamental period. Also, in 2014, Yang and Adeli [3] analyzed 24-moment frame models, including regular, irregular in plan, and irregular in height, to provide an experimental equation to estimate the period time of steel

moment frame, in addition to the height of the building, it uses the Parameters of the ratio of average height to maximum floor height and also the ratio of the average dimension to the maximum dimension in the desired direction.

2- Methodology

Given the above issues, the parameter of height and the consideration of irregular effects on the plan and height of the building in the experimental equation of fundamental period can greatly impact its accuracy. In this paper, first by extracting the fundamental period, architectural and geotechnical information of 23 real moment frame steel structure (Table 1) has estimated the experimental equation of the main period time by considering irregular effects in the plan and height and interaction and comparing it with the equation between 2800, ASCE7-16 [4] and UBC-97 standards. Then, the proposed equation was validated using 10 fundamental periods obtained from analytical modeling of real structures in Tehran (Table 2).

In Tables 1 and 2, H is the height of the structure in meters from the base level, h_{ave} / h_{max} ratio of average floor height to maximum floor height, D_{ave} / D_{max} ratio of the average building dimension to the maximum available dimension, A_{ave} / A_{max} is the ratio of the average floor area to the maximum

*Corresponding author's email: m_hamidia@sbu.ac.ir



Table 1. Mean and standard deviation of experimental data

	Height(m)	h_{ave}/h_{max}	D_{ave}/D_{max}	A_{ave}/A_{max}	V_{s30}/V_{max}	T(sec)
Mean	36.22	0.79	0.95	0.84	0.25	1.61
SD	21.61	0.19	0.12	0.19	0.09	0.89

Table 2. Mean and standard deviation of analytical data

	Height(m)	h_{ave}/h_{max}	D_{ave}/D_{max}	A_{ave}/A_{max}	V_{s30}/V_{max}	T(sec)
Mean	37.85	0.83	0.91	0.71	0.37	1.89
SD	11.5	0.07	0.06	0.14	0.09	0.54

available area, and V_{s30}/V_{max} Shear waves speed up to a depth of 30 meters from the site to its maximum. In this paper, the maximum speed of shear waves is 1500 meters per second.

Equation 1 shows the empirical equation with the above-mentioned 4 dimensionless variables along with the height of the building for a more accurate estimate of the period time:

$$T_e = 0.05(H)^{0.85} \left(\frac{h_{ave}}{h_{max}}\right)^{-0.08} \left(\frac{D_{ave}}{D_{max}}\right)^{-0.44} \left(\frac{A_{ave}}{A_{max}}\right)^{0.25} 1.88 \left(\frac{V_{s30}}{V_{max}}\right) \quad (1)$$

provided by ASCE7-16 and the real periodicity values. (c) Shows the period time values provided by UBC-97 and the real period time values, as is clear from these forms, equation proposed by 2800, ASCE7-16, UBC-97 standards do not have acceptable accuracy, forms, equation proposed by 2800, ASCE7-16, UBC-97 standards do not have acceptable accuracy, especially for values of period time greater than 2 seconds, and the proposed equation have a favorable estimate.

3- Results and Discussion

Figure 1 shows the values of predicted fundamental period values obtained by Equation 1 proposed in this paper, the values obtained using 2800, ASCE7-16 and UBC-97 seismic codes, all versus the measured fundamental period values for experimental database.

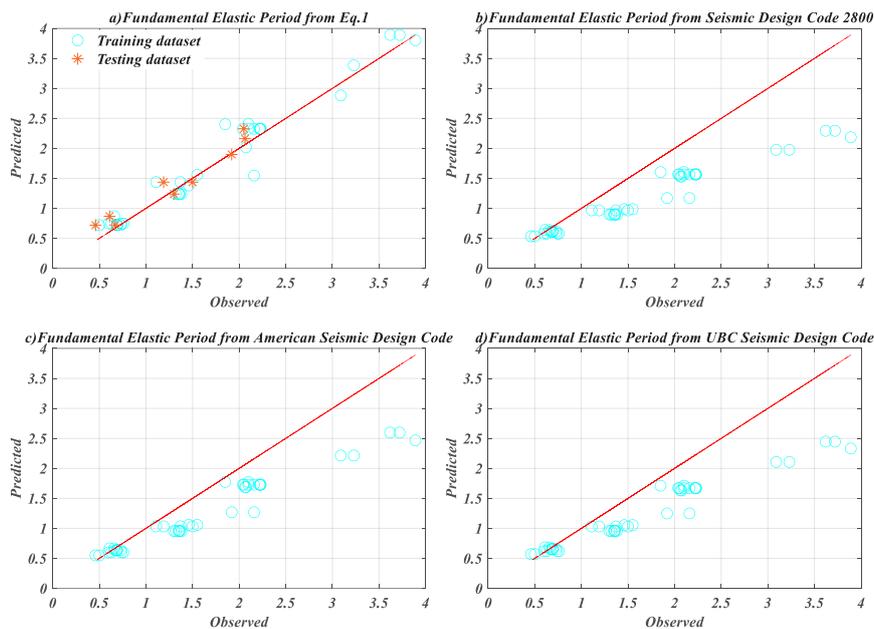


Fig. 1. Comparison of fundamental periods obtained from Equation 7, 2800, ASCE7-16 and UBC-97 seismic codes

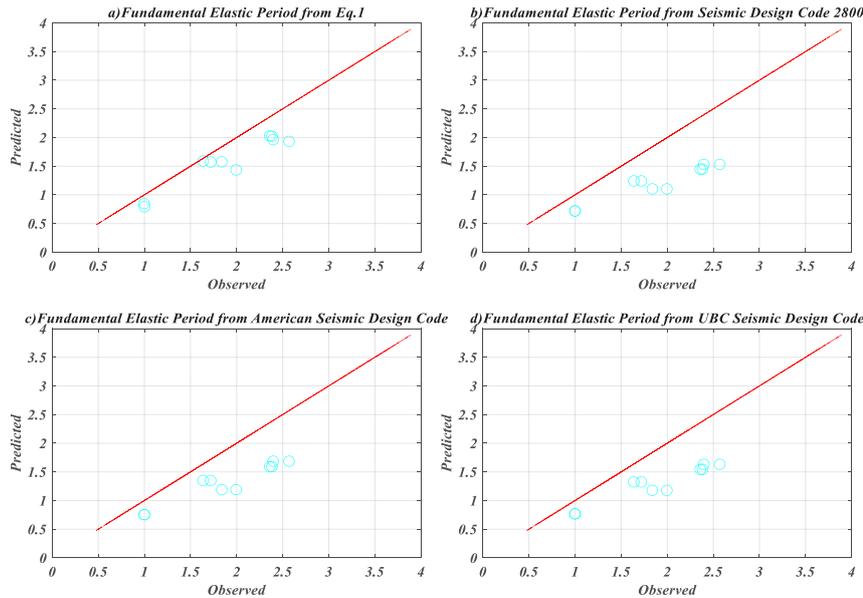


Fig. 2. Comparison of fundamental periods for numerical cases obtained from Equation 7, 2800, ASCE7-16 and UBC-97 seismic codes

Figure 2 shows the values of predicted fundamental period values obtained by Equation 1 proposed in this paper, the values obtained using 2800, ASCE7-16 and UBC-97 seismic codes, all versus the derived fundamental period values for the numerical database.

As clearly shown in the Figures, equations proposed by 2800, ASCE7-16, UBC-97 standards do not have acceptable accuracy, especially for values of period time greater than 1.5 seconds, and the proposed equation has acceptable accuracy.

4- Conclusion

In this paper, an empirical equation is developed for estimating the fundamental period of the steel frame buildings. The proposed equation has acceptable accuracy. The following results indicate the accuracy of the proposed equation compared to the existing seismic code equations:

1. The root mean square of error (*RMSE*) for training the proposed formula for 45 field databases is 0.2, the *RMSE* for test data is equal to 0.18, the *RMSE* of the equation prescribed by 2800 is equal to 0.62, the value for ASCE7-16 equation is equal to 0.5, and for the UBC-97 equation is equal to 0.54.

2. The *RMSE* of the proposed equation for 10 data from the numerical dataset equals 0.36. The corresponding value for the 2800 seismic code equals 0.74, the value for ASCE7-16 seismic code equals 0.63 and the value for UBC-97 seismic code is equal to 0.66.

3- The coefficient of determination (R^2) for training the proposed equation for 45 field databases equals 0.96. The

corresponding value for the testing dataset with the proposed equation test, the 2800 seismic code equation, the ASCE7-16 seismic code equation, and the UBC-97 seismic code equation are all equal to 0.95.

4- The coefficient of determination (R^2) for training the proposed equation for 10 numerical databases equals 0.91. The corresponding value for the testing dataset with the proposed equation test, the 2800 seismic code equation, the ASCE7-16 seismic code equation, and the UBC-97 seismic code equation are all equal to 0.90.

Medium- and high-rise steel moment frame structures located in the descending region of the reflection spectrum benefit the most from the proposed equation by the reduction in the base shear force.

References

- [1] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800-14, 4th ed., Building and Housing Research Center, Tehran, Iran, 2014.
- [2] Uniform Building Code, U. B. C., International conference of building officials, Whittier, CA, (1997).
- [3] K. Young, H. Adeli, Fundamental period of irregular moment-resisting steel frame structures, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(15) (2014) 1141-1157.
- [4] ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures, in, American Society of Civil Engineers, 2016.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. J. Hamidia, F. Nejabati, Predictive equations for fundamental period of steel moment frames considering the effects of irregularity in the floor plan and height and soil-structure interaction, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 457-460.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20426.7421





ارائه رابطه تجربی برای تخمین زمان تناوب اصلی قاب‌های خمشی فولادی با در نظر گرفتن اثرات نامنظمی در پلان و ارتفاع و اندرکنش خاک و سازه

محمد جواد حمیدیا^{*}، فاضل نجابتی

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۶
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱

کلمات کلیدی:

رابطه تجربی
تخمین زمان تناوب اصلی
قاب خمشی فولادی
نامنظمی
اندرکنش خاک
سازه، استاندارد ۲۸۰۰

خلاصه: آیین‌نامه‌های مختلف طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، روابط گوناگونی را جهت محاسبه دوره تناوب اصلی ارتعاش ساختمان‌ها ارائه می‌نمایند. این روابط تجربی معمولاً از انجام آزمایش‌های گوناگون بر روی ساختمان‌های موجود و اندازه‌گیری دوره تناوب آن‌ها به دست می‌آیند و عمدتاً بر مبنای ارتفاع سازه می‌باشند. به دلیل رابطه مستقیم پارامترهای طراحی همچون برش پایه و جابجایی ساختمان با دوره تناوب سازه، برآورد دقیق‌تر دوره تناوب از روابط آیین‌نامه از اهمیت بالایی برخوردار است. این مقاله به ارائه رابطه تجربی برای تخمین دقیق‌تر زمان تناوب اصلی قاب‌های خمشی فولادی با در نظر گرفتن اثرات نامنظمی در پلان و ارتفاع و اندرکنش خاک و سازه پرداخته است. در همین راستا پایگاهی متشکل از ۴۵ داده میدانی زمان تناوب، اطلاعات معماری و ژئوتکنیک برای ساختمان‌های با قاب خمشی فولادی استخراج گردیده است. سپس رابطه‌ای تجربی برای تخمین زمان تناوب اصلی با در نظر گرفتن اثرات نامنظمی و اندرکنش خاک و سازه با استفاده از برازش کمیته پیشنهاد گردیده و با نتایج حاصل از رابطه استانداردهای ۲۸۰۰، ASCE7-16 و UBC-97 مقایسه شده است. رابطه پیشنهادی با استفاده از ۱۰ زمان تناوب طبیعی حاصل از مدل‌سازی تحلیلی سازه‌های واقعی شهر تهران، صحت‌سنجی شده است. نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی با دقت خوبی، میزان زمان تناوب طبیعی را پیش‌بینی می‌نمایند. داده‌های حاصل از روابط پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰، ASCE7-16 و UBC-97 برای زمان تناوب سازه‌های با ارتفاع متوسط و زیاد با مقادیر واقعی اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارند.

۱- مقدمه و مرور ادبیات فنی

زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۱-۴] جهت محاسبه زمان تناوب ساختمان‌ها بیان شده‌اند، از تصحیح و تغییر روابط آیین‌نامه‌های مختلفی همچون UBC [۵] به دست آمده‌اند. در روابط ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) از میان مشخصات سازه‌ای، تنها ارتفاع ساختمان لحاظ گردیده است که این مسئله می‌تواند به کاهش دقت روابط اخیر منجر گردد زیرا برای دو ساختمان هم ارتفاع با ابعاد متفاوت در پلان و ارتفاع و شرایط متفاوت خاک ساختگاه یک مقدار دوره تناوب را به دست می‌دهند.

در سال ۱۹۶۰ تاکوچی^۱ [۶] با استفاده از نتایج آزمایش‌های لرزه‌ای بر روی ۶۰ ساختمان اسکلت بتنی و فولادی، رابطه‌ای میان دوره تناوب و ارتفاع ساختمان‌ها ارائه داد. در رابطه او اثر اجزاء مقاومت جانبی هم وارد شده است. آیتور^۲ [۷] با طراحی و ساخت یک دستگاه اندازه‌گیری دوره تناوب، زمان تناوب ارتعاش سازه‌های گوناگون را به دست آورد و از مقایسه نتایج به دست آمده با مقادیر متناظر آیین‌نامه کشور ترکیه پیشنهاد تصحیح روابط

پدیده زلزله از جمله خطراتی است که می‌تواند خسارات جبران ناپذیر جانی و مالی فراوانی به همراه داشته باشد. پاسخ هر سازه در حالت الاستیک صرفاً به زمان تناوب و میرایی سازه وابسته است. در ناحیه غیرخطی نیز زمان تناوب سازه از مهم‌ترین پارامترها در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به شمار می‌رود به عبارت دیگر خواص دینامیکی سازه‌ها شامل زمان تناوب طبیعی ارتعاش، شکل مودهای ارتعاش و درصد میرایی از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که تعیین کننده عکس‌العمل سازه‌ها در مقابل زمین‌لرزه می‌باشند و انجام بارگذاری دینامیکی بر روی سازه‌های مختلف، نیازمند مشخص بودن این خصوصیات است. مشکل عمده برآورد این پارامترها برای این است که هنوز ساخته نشده‌اند. به عنوان مثال در مرحله آنالیز، نیاز به تخمین دقیقی از دوره تناوب طبیعی ارتعاش ساختمان می‌باشد تا با استفاده از آن بتوان نیروی برش پایه را محاسبه نمود. روابطی که در آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر

1 Takeuchi
2 Aytur

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_hamidia@sbu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



محاسبه زمان تناوب ارتعاش ساختمان‌های با سیستم قاب خمشی و دیوار برشی پرداختند. هونگ و هووانگ^۸ [۱۵]، رفتار ۲۱ ساختمان قاب خمشی بتنی را در اثر تحریکات لرزه‌ای ثبت نمودند و با استفاده از دوره تناوب‌های به دست آمده، رابطه‌ای تجربی برای تخمین زمان تناوب ارتعاش ساختمان‌ها به دست آوردند. در گزارش ایشان به اهمیت پارامتر ارتفاع نسبت به عوامل دیگر همچون ابعاد ساختمان و عمر ساختمان اشاره شده است. سرکار و همکاران [۱۶]، به اصلاح کد مشخص شده فرمول تجربی برای دوره تناوب اساسی برای قاب‌های منظم و برآورد مدت زمان تناوب اساسی برای قاب‌های که دارای بی‌نظمی هندسی در ارتفاع هستند پرداختند و در آخر پیشنهاد یک معادله بنیادی به عنوان یک تابع از شاخص نظم دادند که برای انواع مختلف ساختمان که دارای نامنظمی هندسی در ارتفاع هستند دارای اعتبار است. نامجویان و همکاران [۱۷] به بررسی دقت زمان تناوب تجربی پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ در مورد قاب‌های خمشی فولادی و مقایسه آن با زمان تناوب به دست آمده از آنالیز کامپیوتری بر روی ۱۵ ساختمان منظم قاب خمشی فولادی از ۱ تا ۱۵ طبقه پرداختند. یانگ^۹ و عادل^{۱۰} [۱۸] با آنالیز ۲۴ مدل قاب خمشی شامل منظم، نامنظم در پلان و نامنظم در ارتفاع به ارائه یک رابطه تجربی برای تخمین زمان تناوب قاب خمشی فولادی پرداختند که علاوه بر ارتفاع ساختمان، به کمیت‌های نسبت ارتفاع متوسط به حداکثر ارتفاع طبقه و همچنین نسبت بعد میانگین به حداکثر بعد در راستای مورد نظر اشاره دارد.

با توجه به یافته‌های پژوهشگران ذکر شده، کمیت ارتفاع و در نظر گرفتن اثرات نامنظمی در پلان و ارتفاع ساختمان در رابطه تجربی زمان تناوب می‌تواند تاثیر بسیار زیادی در دقت آن داشته باشد. در این مقاله ابتدا با استخراج زمان تناوب، اطلاعات معماری و ژئوتکنیک ۲۳ مدل واقعی سازه قاب خمشی فولادی به تخمین رابطه تجربی زمان تناوب اصلی با در نظر گرفتن اثرات نامنظمی در پلان و ارتفاع و اندرکنش و مقایسه آن با رابطه استانداردهای ۲۸۰۰، ASCE7-16 [۱۹] و UBC-97 پرداخته شده است. سپس رابطه پیشنهادی با استفاده از ۱۰ زمان تناوب طبیعی حاصل از مدل‌سازی تحلیلی سازه‌های واقعی شهر تهران، صحت‌سنجی شده است.

۲- اثر اندرکنش خاک و سازه

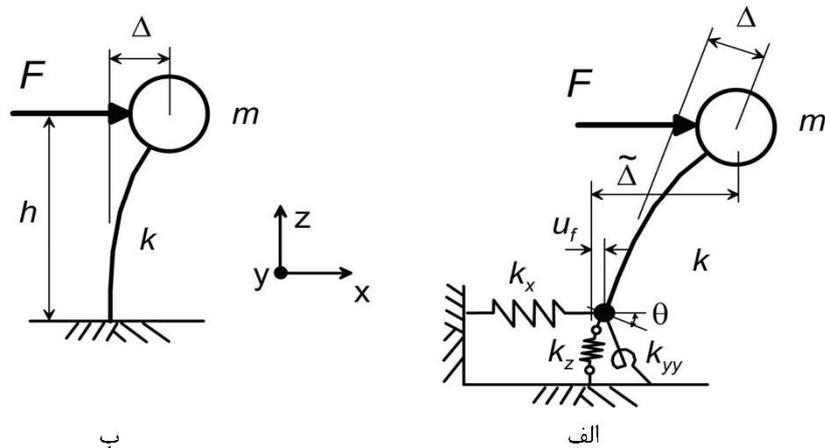
مدل ساده‌سازی شده دو سازه با هندسه و مصالح یکسان یکی با پایه صلب و دیگری روی خاک نرم در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. با فرض

8 Hong & Hwang
9 Young

آیین‌نامه را ارائه نمود. اودوادیا^۱ و تریفوناک [۸] آزمایش ارتعاش محیطی را بر روی چند سازه واقعی انجام دادند و نتایج حاصل را با نتایج به دست آمده از آزمایش ارتعاش اجباری و داده‌های حاصل از زلزله مقایسه نمودند. آن‌ها تغییرات خصوصیات دینامیکی ساختمان‌ها را، قبل و بعد از زلزله مورد توجه قرار دادند. هارت^۲ و همکاران [۹]، ارتعاشات محیطی ۱۹ ساختمان بلند را که رکوردهای ناشی از زلزله ۱۳ ساختمان آن در دسترس بود، مورد مطالعه قرار دادند و خصوصیات آن‌ها را در برابر زلزله و ارتعاشات محیطی به دست آوردند. با استفاده از این مطالعه آن‌ها توانستند یک طیف طرح به دست آورند. برترو^۳ و همکاران [۱۰] با اندازه‌گیری دوره تناوب ۱۵ ساختمان با قاب بتن آرمه، به بررسی رابطه پیشنهادی آیین‌نامه SEAOC پرداختند. آن‌ها از مقایسه نتایج، تعیین نمودند که روابط آیین‌نامه برای سازه‌هایی که رفتار قاب خمشی در آن‌ها تعیین کننده است مقدار دست پایینی به دست می‌دهند و همچنین استفاده از روابط آیین‌نامه باید به ساختمان‌های با سختی یکنواخت (در جهات اصلی) محدود شود. کوله^۴ و همکاران [۱۱] با استفاده از داده‌های ثبت شده زلزله ۶۴ ساختمان در ایالات کالیفرنیا، زمان تناوب ارتعاش این ساختمان‌ها را به دست آوردند و نتایج حاصل را با مقادیر به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌های UBC91 و SEAOC مقایسه نمودند و با استفاده از نتایج به دست آمده به تصحیح این روابط پرداختند. لاتگالا^۵ و مرا [۱۲] با انجام آزمایش AVS^۶ به روی ۳۶ ساختمان قاب بتنی و ۴ ساختمان قاب فولادی، روابطی تجربی جهت محاسبه دوره تناوب اصلی ساختمان‌ها به دست آوردند.

بررسی نتایج آزمایش برای ۱۱ عدد از این ساختمان‌ها بیان کننده اهمیت و نقش تاثیرگذار عناصر غیر سازه‌ای در خصوصیات دینامیکی ساختمان‌ها بود. گول و چوپرا^۷ [۱۳ و ۱۴] با استفاده از رکوردهای ثبت شده زلزله تا این سال، در دو گروه ساختمان‌های قاب خمشی و دیوار برشی، به بازنگاری فرمول آیین‌نامه‌های آمریکا پرداختند. از نتایج قابل توجه در این تحقیق، تغییر قابل توجه دوره تناوب سازه‌های بتنی در لرزه‌های شدید است که نقش ترک خوردگی بتن را بر این خصوصیت دینامیکی مشخص نمود. آن‌ها برای هر سه نوع سیستم سازه‌ای، با استفاده از نتایج حاصل رابطه جدیدی ارائه دادند. همین افراد بر مبنای کار تحقیقاتی قبلی به ارائه روابطی جدید جهت

1 Udwardia
2 Hart
3 Bertero
4 Cole
5 La Tegala
6 Ambient Vibration Surveying
7 Goel & Chopra



شکل ۱. الف) جابجایی سازه معادل یک درجه آزادی در حالت خاک نرم، ب) جابجایی سازه معادل یک درجه آزادی در حالت پایه صلب

Fig. 1. a) Displacement of the equivalent single degree of freedom structure on soft soil b) Displacement of the equivalent single degree of freedom structure on the rigid foundation

با توجه به مجموع مباحث فوق، تدقیق رابطه تجربی برای تخمین زمان تناوب با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه ضروری به نظر می‌رسد.

۳- پایگاه داده

جدول ۱ شامل اطلاعات معماری و ژئوتکنیک ۲۳ مدل واقعی ساختمانی است. در این جدول، H ارتفاع سازه بر حسب متر از تراز پایه، h_{ave}/h_{max} نسبت میانگین ارتفاع طبقات به حداکثر ارتفاع طبقه، D_{ave}/D_{max} نسبت میانگین بعد ساختمان به حداکثر بعد موجود، A_{ave}/A_{max} نسبت میانگین مساحت طبقات به حداکثر مساحت موجود و V_{s30}/V_{max} سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر از ساختمان مورد نظر به حداکثر آن می‌باشد. در این مقاله حداکثر سرعت موج برشی ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. جزئیات ساختاری (پلان معماری) از ساختارهای CSMIP در وب سایت آنلاین داده‌های حرکت قوی (USGS, 2011) در دسترس است [۲۱].

در کل ۲۳ مدل ساختمان را مورد بررسی قرار داده شده است، جمع کل داده‌ها در جهت طولی و عرضی ۴۵ می‌باشد.

با توجه به شکل ۲ که پلان طبقه i ام از یک ساختمان دلخواه را نشان می‌دهد، پارامترهای جدول ۱ در روابط (۲ تا ۵) نشان داده شده است:

وقوع زلزله یکسان در هر دو سازه ذکر شده، زمان تناوب ارتعاش یکسان نیست [۲۰].

مطابق شکل ۱، در حالتی که خاک ساختگاه نرم باشد، ماکسیمم جابجایی ایجاد شده در ساختمان بیشتر می‌شود. همچنین مدت زمان رفت و برگشت (زمان تناوب طبیعی) نیز بیشتر است. موضوع مطرح شده در متن فوق را آیین‌نامه‌های طراحی از طریق رابطه (۱) بیان می‌نمایند [۲۰]:

$$\frac{\bar{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_{xx}} + \frac{kh^2}{k_{yy}}} \quad (1)$$

در رابطه فوق \bar{T} زمان تناوب اصلی سازه در حالت خاک نرم (در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه)، T زمان تناوب اصلی سازه در حالت پایه گیردار (صرف نظر از اثر اندرکنش خاک و سازه)، k سختی سازه، k_{xx} سختی انتقالی خاک در جهت x ، k_{yy} سختی دورانی خاک در جهت y و h ارتفاع از تراز پایه ساختمان می‌باشند.

این رابطه نشان می‌دهد که همواره زمان تناوب با در نظر گرفتن اثر اندرکنش از زمان تناوب در حالت پایه گیردار بزرگ‌تر است.

جدول ۱. اطلاعات ۲۳ مدل ساختمان تحت ارتعاش زلزله های مهم

Table 1. Summary of 23 building models data under the excitation of major earthquakes

ردیف	شهر	تعداد طبقات	H (m)	h_{ave}/h_{max}	$(D_{ave}/D_{max})_x$	$(D_{ave}/D_{max})_y$	A_{ave}/A_{max}	V_{s30}/V_{max}	T_x (sec)	T_y (sec)
1	San Jose	3	15.09	0.92	1	1	1	0.43	0.69	0.73
2	San Francisco	4	16	0.97	1	1	0.92	0.18	0.66	0.61
3	Red lands	7	28.58	0.97	0.72	0.55	0.45	0.17	1.46	1.55
4	Burbank	6	25.15	0.79	1	1	1	0.29	1.35	1.36
5	Long Beach	7	27.74	1	1	1	1	0.15	1.11	1.37
6	San Bernardino	9	35.84	0.73	1	0.63	0.61	0.23	2.16	1.92
7	Pasadena	12	51.21	1	0.71	0.83	0.48	0.29	2.06	2.07
8	San Jose	12	52.76	0.6	1	1	0.7	0.18	2.1	2.04
9	Pasadena	12	54.51	0.62	0.79	0.79	0.63	0.29	1.85	2.1
10	Los Angeles	16	71.93	0.53	0.91	0.63	0.57	0.26	3.09	3.23
11	Long Beach	17	87.78	0.4	1	1	0.93	0.21	3.72	3.62
12	Long Beach	7	27.74	1	1	1	1	0.15	1.19	1.5
13	Burbank	6	25.15	0.79	1	1	1	0.29	1.36	1.38
14	Burbank	6	25.15	0.79	1	1	1	0.29	1.32	1.3
15	Los Angeles	19	82.3	0.47	1	1	1	0.17	3.89	-
16	San Jose	3	15.09	0.92	1	1	1	0.43	0.67	0.69
17	San Jose	3	15.09	0.92	1	1	1	0.43	0.69	0.69
18	San Jose	12	52.76	0.6	1	1	0.7	0.18	2.22	2.22
19	San Jose	12	52.76	0.6	1	1	0.7	0.18	2.23	2.23
20	San Jose	12	52.76	0.6	1	1	0.7	0.18	2.05	2.16
21	San Bernardino	3	12.6	0.88	1	1	1	0.2	0.5	0.46
22	Richmond	3	14.07	0.99	1	1	1	0.28	0.63	0.74
23	Richmond	3	14.07	0.99	1	1	1	0.28	0.6	0.76

$$A_{max} = \max(D_{i,x} * D_{i,y}) \quad (5)$$

$$D_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i \quad (2)$$

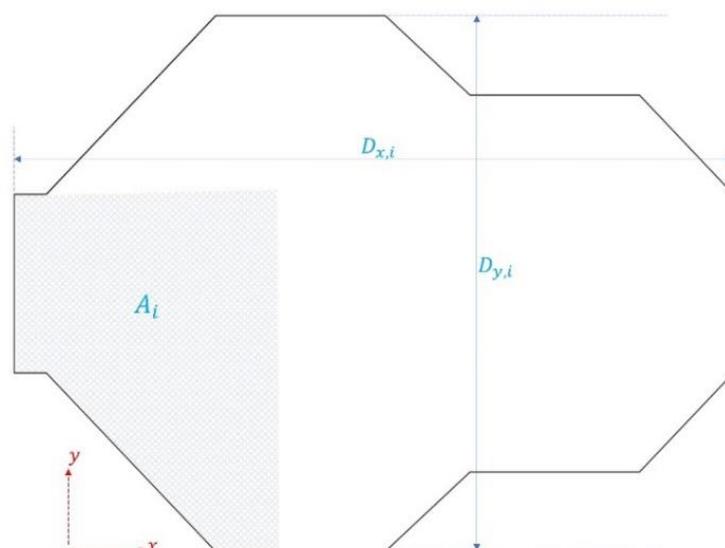
در روابط (۲ تا ۵)، N تعداد طبقات سازه از تراز پایه ساختمان می‌باشد.

$$A_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (3)$$

۴- رابطه تجربی پیشنهادی

رابطه (۶)، رابطه تجربی با ۴ متغیر بی‌بعد پیش گفته به همراه ارتفاع ساختمان برای تخمین دقیق‌تر زمان تناوب را نشان می‌دهد. در این رابطه، جمله h_{ave}/h_{max} اثر نامنظمی هندسی در ارتفاع ساختمان، عبارت‌های D_{ave}/D_{max} و A_{ave}/A_{max} اثرات نامنظمی هندسی در پلان طبقات و

$$D_{max} = \max(D_1, \dots, D_N) \quad (4)$$



شکل ۲. پلان طبقه i ام از یک ساختمان دلخواه

Fig. 2. I floor plan of the sample building

تولید مثل^۳، تقاطع^۴ و جهش^۵ با به حداقل رساندن خطا جهت ایجاد بهترین راه‌حل‌های ممکن عمل می‌کند. در شکل ۳ درخت‌واره رابطه پیشنهادی با استفاده از برازش کمیتی نشان داده شده است. در این راستا، ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش^۶ شبکه و ۲۰ درصد آن‌ها برای ارزیابی^۷ در نظر گرفته شده است.

$$T_e = 0.05(H)^{0.85} \left(\frac{h_{ave}}{h_{max}} \right)^{-0.08} \left(\frac{D_{ave}}{D_{max}} \right)^{-0.44} \left(\frac{A_{ave}}{A_{max}} \right)^{0.25} 1.88^{1 - \left(\frac{v_{s,30}}{v_{max}} \right)} \quad (7)$$

با کاهش مقدار h_{ave}/h_{max} ، زمان تناوب طبق رابطه (۷) افزایش پیدا می‌کند. این افزایش با فیزیک حاکم بر آن سازگاری دارد. زیرا اگر ارتفاع طبقه‌ای از ساختمان نسبت به ارتفاع طبقات دیگر بیشتر باشد، طبقه نرم تشکیل می‌شود با ایجاد طبقه نرم، سختی کل سازه کاهش پیدا می‌کند و با کاهش سختی، زمان تناوب افزایش پیدا می‌کند.

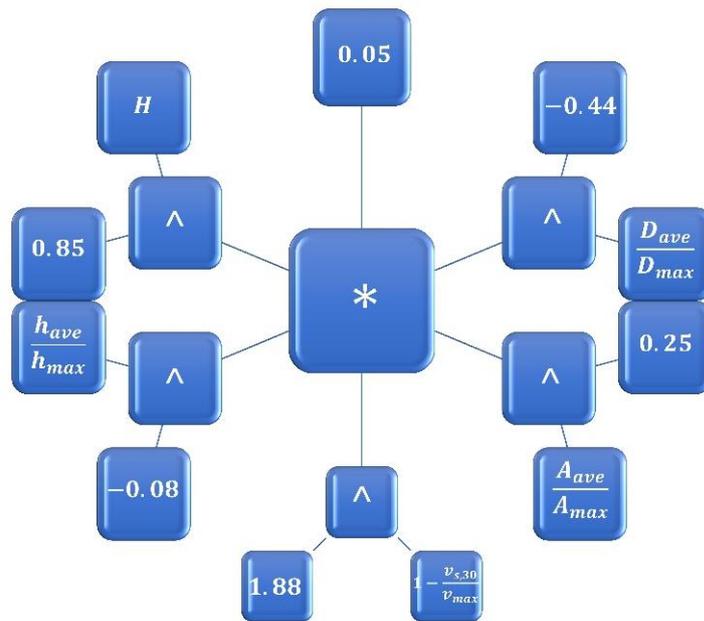
جمله V_{s30}/V_{max} اثر اندرکنش خاک و سازه را نشان می‌دهد. بدیهی است هر کدام از کمیت‌های ذکر شده می‌تواند باعث افزایش و یا کاهش مقدار زمان تناوب شود. لذا این کمیت‌ها به صورت توانی در رابطه جای‌گذاری شده‌اند.

$$T_e = a(H)^b \left(\frac{h_{ave}}{h_{max}} \right)^c \left(\frac{D_{ave}}{D_{max}} \right)^d \left(\frac{A_{ave}}{A_{max}} \right)^e f^{1 - \left(\frac{v_{s,30}}{v_{max}} \right)} \quad (6)$$

ضرایب a,b,c,d,e,f ثابت‌های رابطه هستند که از طریق تحلیل برازش کمیتی^۱ به دست می‌آیند [۲۲]. برازش کمیتی روشی برای پیدا کردن تابع تحلیلی ریاضی یک سیستم فیزیکی است که ویژگی‌های ذاتی سیستم را به خروجی‌های اندازه‌گیری شده مرتبط می‌کند. بر خلاف روش‌های برازش سنتی که متناسب با یک حالت خاص است، وقتی متغیرهای ورودی حقیقی هستند، ضرایب عددی مدل پیش‌بینی شده در این روش برازش، یک مجهول اضافی هستند. برازش کمیتی بر اساس الگوریتم‌های ژنتیک^۲ با استفاده از

- 3 Reproduction
- 4 Crossover
- 5 Mutation
- 6 Train
- 7 Test

- 1 Symbolic regression
- 2 Genetic algorithms



شکل ۳. درخت‌واره برازش کمی برای رابطه پیشنهادی

Fig. 3. Symbolic regression flowchart for the proposed equation

۵- بررسی نتایج

در جدول ۲، مقادیر زمان تناوب به دست آمده از رابطه (۷) و مقدار واقعی که از طریق آزمایش‌های لرزه‌ای (راستای طولی و عرضی به تفکیک) به دست آمده‌اند، و همچنین خطای مطلق که از قدر مطلق اختلاف زمان تناوب برازش شده و واقعی حاصل می‌شود، نشان داده شده است. در جدول ۳، مقادیر زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد ۲۸۰۰ و مقدار واقعی که از طریق آزمایش‌های لرزه‌ای (راستای طولی و عرضی به تفکیک) به دست آمده‌اند، و همچنین خطای مطلق که از قدر مطلق اختلاف زمان تناوب ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ و واقعی حاصل می‌شود نشان داده شده است. در جدول ۴، مقادیر زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد ASCE7-16 و مقدار واقعی که از طریق آزمایش‌های لرزه‌ای (راستای طولی و عرضی به تفکیک) به دست آمده‌اند و همچنین خطای مطلق که از قدر مطلق اختلاف زمان تناوب ارائه شده در استاندارد ASCE7-16 و واقعی حاصل می‌شود نشان داده شده است. در جدول ۵، مقادیر زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد UBC-97 و مقدار واقعی که از طریق آزمایش‌های لرزه‌ای (راستای طولی و عرضی به تفکیک) به دست آمده‌اند

همچنین با کاهش مقدار V_{s30} / V_{max} ، زمان تناوب افزایش پیدا می‌کند. به عبارتی اگر سرعت موج برشی متوسط تا عمق ۳۰ متر از ساختمان مورد نظر کاهش پیدا کند به معنای این هست که خاک مورد نظر سختی برشی کمی دارد. با کاهش در سختی برشی، کرنش برشی خاک افزایش پیدا می‌کند. و خاک رفتاری مانند زله پیدا می‌کند. با ارتعاش ذرات موجود در خاک، جابجایی سازه نسبت به حالت پایه صلب بیشتر می‌شود. با افزایش جابجایی، مدت زمان رفت و برگشت سازه (زمان تناوب) بیشتر خواهد شد. با کاهش مقدار D_{ave} / D_{max} ، زمان تناوب افزایش پیدا می‌کند. به عبارتی اگر طول دهانه‌های موجود در طبقات افزایش یابد، سختی کل قاب کاهش و با کاهش سختی، مقدار زمان تناوب اصلی افزایش می‌یابد. با کاهش مقدار A_{ave} / A_{max} ، زمان تناوب کاهش پیدا می‌کند. به عبارتی اگر مساحت طبقات کاهش پیدا کند، با فرض کاربری یکسان، جرم ساختمان کاهش پیدا می‌کند. با کاهش جرم، مقدار زمان تناوب اصلی کاهش می‌یابد. از مقایسه‌های بالا نتیجه می‌گیریم که ضرایب به دست آمده حاصل از برازش، با مفاهیم فیزیکی شهودی حاکم بر میزان زمان تناوب سازگاری دارند.

جدول ۲. مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه ۷ و زمان تناوب داده شده در «جدول ۱» (راستای طولی-عرضی)

Table 2. Comparison of the fundamental period obtained from Equation 7 and the measured fundamental period listed in "Table 1" (longitudinal and transverse directions)

ردیف	H (m)	T_x (sec)	T_y (sec)	T_{ex} (sec)	T_{ey} (sec)	خطای مطلق (طولی) (ثانیه)	خطای مطلق (عرضی) (ثانیه)
1	15.09	0.69	0.73	0.72	0.72	0.03	0.01
2	16	0.66	0.61	0.87	0.87	0.21	0.26
3	28.58	1.46	1.55	1.38	1.56	0.08	0.01
4	25.15	1.35	1.36	1.24	1.24	0.11	0.12
5	27.74	1.11	1.37	1.44	1.44	0.33	0.07
6	35.84	2.16	1.92	1.55	1.90	0.61	0.02
7	51.21	2.06	2.07	2.16	2.02	0.10	0.05
8	52.76	2.1	2.04	2.33	2.33	0.23	0.29
9	54.51	1.85	2.1	2.40	2.41	0.55	0.31
10	71.93	3.09	3.23	2.88	3.38	0.21	0.15
11	87.78	3.72	3.62	3.89	3.89	0.17	0.27
12	27.74	1.19	1.5	1.44	1.44	0.25	0.06
13	25.15	1.36	1.38	1.24	1.24	0.12	0.14
14	25.15	1.32	1.3	1.24	1.24	0.08	0.06
15	82.3	3.89	-	3.80	-	0.09	-
16	15.09	0.67	0.69	0.72	0.72	0.05	0.03
17	15.09	0.69	0.69	0.72	0.72	0.03	0.03
18	52.76	2.22	2.22	2.33	2.33	0.11	0.11
19	52.76	2.23	2.23	2.33	2.33	0.10	0.10
20	52.76	2.05	2.16	2.33	2.33	0.28	0.17
21	12.6	0.5	0.46	0.72	0.72	0.22	0.26
22	14.07	0.63	0.74	0.75	0.75	0.12	0.01
23	14.07	0.6	0.76	0.75	0.75	0.15	0.01

جدول ۳. مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد $۲۸+۰$ و زمان تناوب داده شده در «جدول ۱» (راستای طولی-عرضی)

Table 3. Comparison of the fundamental period obtained from 2800 seismic code and the measured fundamental period listed in "Table 1" (longitudinal and transverse directions)

ردیف	H (m)	T_x (sec)	T_y (sec)	T_{2800} (sec)	خطای مطلق (طولی) (ثانیه)	خطای مطلق (عرضی) (ثانیه)
1	15.09	0.69	0.73	0.61	0.08	0.12
2	16	0.66	0.61	0.64	0.02	0.03
3	28.58	1.46	1.55	0.99	0.47	0.56
4	25.15	1.35	1.36	0.90	0.45	0.46
5	27.74	1.11	1.37	0.97	0.14	0.40
6	35.84	2.16	1.92	1.17	0.99	0.75
7	51.21	2.06	2.07	1.53	0.53	0.54
8	52.76	2.1	2.04	1.57	0.53	0.47
9	54.51	1.85	2.1	1.60	0.25	0.50
10	71.93	3.09	3.23	1.98	1.11	1.25
11	87.78	3.72	3.62	2.29	1.43	1.33
12	27.74	1.19	1.5	0.97	0.22	0.53
13	25.15	1.36	1.38	0.90	0.46	0.48
14	25.15	1.32	1.3	0.90	0.42	0.40
15	82.3	3.89	-	2.19	1.70	-
16	15.09	0.67	0.69	0.61	0.06	0.08
17	15.09	0.69	0.69	0.61	0.08	0.08
18	52.76	2.22	2.22	1.57	0.65	0.65
19	52.76	2.23	2.23	1.57	0.66	0.66
20	52.76	2.05	2.16	1.57	0.48	0.59
21	12.6	0.5	0.46	0.53	0.03	0.07
22	14.07	0.63	0.74	0.58	0.05	0.16
23	14.07	0.6	0.76	0.58	0.02	0.18

جدول ۴. مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد ASCE7-16 و زمان تناوب داده شده در «جدول ۱» (راستای طولی-عرضی)

Table 4. Comparison of the fundamental period obtained from ASCE7-16 seismic code and the measured fundamental period listed in "Table 1" (longitudinal and transverse directions)

ردیف	H (m)	T_x (sec)	T_y (sec)	$T_{ASCE7-16}$ (sec)	خطای مطلق (طولی) (ثانیه)	خطای مطلق (عرضی) (ثانیه)
1	15.09	0.69	0.73	0.63	0.06	0.10
2	16	0.66	0.61	0.67	0.01	0.06
3	28.58	1.46	1.55	1.06	0.40	0.49
4	25.15	1.35	1.36	0.96	0.39	0.40
5	27.74	1.11	1.37	1.03	0.08	0.34
6	35.84	2.16	1.92	1.27	0.89	0.65
7	51.21	2.06	2.07	1.69	0.37	0.39
8	52.76	2.1	2.04	1.73	0.37	0.31
9	54.51	1.85	2.1	1.77	0.08	0.33
10	71.93	3.09	3.23	2.21	0.88	1.02
11	87.78	3.72	3.62	2.60	1.12	1.02
12	27.74	1.19	1.5	1.03	0.16	0.47
13	25.15	1.36	1.38	0.96	0.40	0.42
14	25.15	1.32	1.3	0.96	0.36	0.34
15	82.3	3.89	-	2.47	1.42	-
16	15.09	0.67	0.69	0.63	0.04	0.06
17	15.09	0.69	0.69	0.63	0.06	0.06
18	52.76	2.22	2.22	1.73	0.49	0.49
19	52.76	2.23	2.23	1.73	0.50	0.50
20	52.76	2.05	2.16	1.73	0.32	0.43
21	12.6	0.5	0.46	0.55	0.05	0.09
22	14.07	0.63	0.74	0.60	0.03	0.14
23	14.07	0.6	0.76	0.60	0.00	0.16

جدول ۵. مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد UBC-97 و زمان تناوب داده شده در «جدول ۱» (راستای طولی-عرضی)

Table 5. Comparison of the fundamental period obtained from UBC-97 seismic code and the measured fundamental period listed in "Table 1" (longitudinal and transverse directions)

ردیف	H (m)	T_x (sec)	T_y (sec)	T_{UBC-97} (sec)	خطای مطلق (طولی) (ثانیه)	خطای مطلق (عرضی) (ثانیه)
1	15.09	0.69	0.73	0.65	0.04	0.08
2	16	0.66	0.61	0.68	0.02	0.07
3	28.58	1.46	1.55	1.05	0.41	0.50
4	25.15	1.35	1.36	0.96	0.39	0.40
5	27.74	1.11	1.37	1.03	0.08	0.34
6	35.84	2.16	1.92	1.25	0.91	0.67
7	51.21	2.06	2.07	1.63	0.43	0.44
8	52.76	2.1	2.04	1.67	0.43	0.37
9	54.51	1.85	2.1	1.71	0.14	0.39
10	71.93	3.09	3.23	2.11	0.98	1.12
11	87.78	3.72	3.62	2.45	1.27	1.17
12	27.74	1.19	1.5	1.03	0.16	0.47
13	25.15	1.36	1.38	0.96	0.40	0.42
14	25.15	1.32	1.3	0.96	0.36	0.34
15	82.3	3.89	-	2.33	1.56	-
16	15.09	0.67	0.69	0.65	0.02	0.04
17	15.09	0.69	0.69	0.65	0.04	0.04
18	52.76	2.22	2.22	1.67	0.55	0.55
19	52.76	2.23	2.23	1.67	0.56	0.56
20	52.76	2.05	2.16	1.67	0.38	0.49
21	12.6	0.5	0.46	0.57	0.07	0.11
22	14.07	0.63	0.74	0.62	0.01	0.12
23	14.07	0.6	0.76	0.62	0.02	0.14

جدول ۶. مقایسه نتایج ۴۵ داده میدانی (رابطه ۷، استاندارد ۲۸۰۰، استاندارد ASCE7-16، استاندارد UBC-97)

Table 6. Comparison of 45 field results (Equation 7, Standard 2800, Standard ASCE7-16, Standard UBC-97)

	آموزش	اعتبار سنجی	۲۸۰۰	ASCE7-16	UBC-97
R^2	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95
$R^2_{adjusted}$	0.95	0.86	0.79	0.86	0.82
RMSE	0.2	0.18	0.62	0.5	0.54

ضریب تعیین تعدیل شده ($R^2_{adjusted}$) طبق رابطه (۸) برای آموزش رابطه پیشنهادی به ازای ۴۵ بانک داده مدل واقعی برابر با ۰/۹۵، تست رابطه پیشنهادی برابر با ۰/۸۶، رابطه استاندارد ۲۸۰۰ برابر با ۰/۷۹، رابطه استاندارد ASCE7-16 برابر با ۰/۸۶ و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۸۲ می‌باشد.

جزر میانگین مربعات خطا (RMSE) طبق رابطه (۹) برای آموزش رابطه پیشنهادی به ازای ۴۵ بانک داده مدل واقعی برابر با ۰/۲، تست رابطه پیشنهادی برابر با ۰/۱۸، رابطه استاندارد ۲۸۰۰ برابر با ۰/۶۲، رابطه استاندارد ASCE7-16 برابر با ۰/۵ و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۵۴ می‌باشد.

همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر ضریب تعیین (R^2) و ضریب تعیین تعدیل شده ($R^2_{adjusted}$) برای رابطه پیشنهادی نسبت به سه استاندارد ذکر شده بزرگ‌تر یا مساوی است. مقدار جزر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای رابطه پیشنهادی نسبت به سه استاندارد است. از مقادیر موجود در جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت رابطه پیشنهادی تخمین مطلوبی دارد.

شکل ۴- (a) مقادیر زمان تناوب برازش شده توسط رابطه پیشنهادی این مقاله و مقادیر زمان تناوب واقعی را نشان می‌دهد. (b) مقادیر زمان تناوب ارائه شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ و مقادیر زمان تناوب واقعی را نشان می‌دهد. (c) مقادیر زمان تناوب ارائه شده توسط استاندارد ASCE7-16 و مقادیر زمان تناوب واقعی را نشان می‌دهد. (c) مقادیر زمان تناوب ارائه شده توسط استاندارد UBC-97 و مقادیر زمان تناوب واقعی را نشان می‌دهد همان‌گونه که از این اشکال مشخص است، روابط پیشنهادی توسط استاندارد های ۲۸۰۰، ASCE7-16، UBC-97 علی‌الخصوص برای مقادیر زمان تناوب بالاتر از ۲ ثانیه از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند و روابط پیشنهادی تخمین مطلوبی دارند.

و همچنین خطای مطلق که از قدر مطلق اختلاف زمان تناوب ارائه شده در استاندارد UBC-97 و واقعی حاصل می‌شود نشان داده شده است. ضریب تعیین تعدیل شده برای تعیین پراکندگی روابط برازش شده، به قرار زیر است:

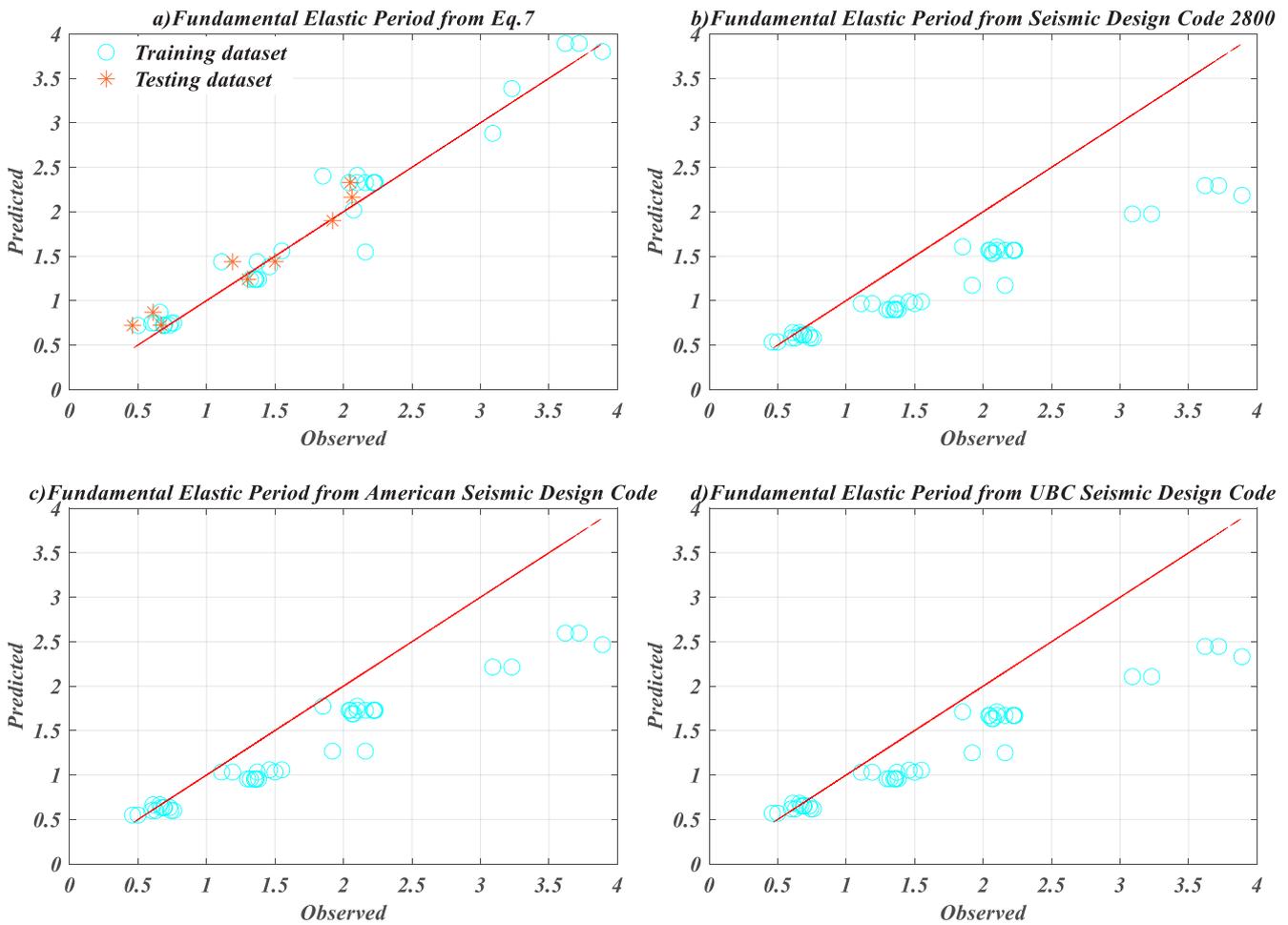
$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{Var(Error_i)}{Var(Observed_i)} * \frac{n-1}{n-k-1} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، n برابر تعداد داده های استفاده شده در انجام برازش و $Var(Error)$ واریانس خطای ناشی از برازش می‌باشد، k تعداد متغیرهای مستقل در رابطه تجربی زمان تناوب، $Var(Observed)$ واریانس خطاهای ناشی از برازش و $Var(Observed)$ واریانس ۴۵ زمان تناوب داده شده در جدول ۱ می‌باشد. همچنین شاخص میزان خطا در روابط برازش شده، به قرار زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Error_i)^2}{n}} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، n برابر تعداد داده‌های استفاده شده در انجام برازش، k تعداد متغیرهای مستقل در رابطه تجربی زمان تناوب، Error خطای ناشی از برازش می‌باشد.

در جدول ۶ ضریب تعیین (R^2) برای آموزش رابطه پیشنهادی به ازای ۴۵ بانک داده مدل واقعی برابر با ۰/۹۶، تست رابطه پیشنهادی، رابطه استاندارد ۲۸۰۰، رابطه استاندارد ASCE7-16 و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۹۵ می‌باشند.



شکل ۴. نمودارهای مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه ۷ و استانداردهای 2800, ASCE7-16 و UBC-97

Fig. 4. Comparison of fundamental periods obtained from Equation 7, 2800, ASCE7-16 and UBC-97 seismic codes

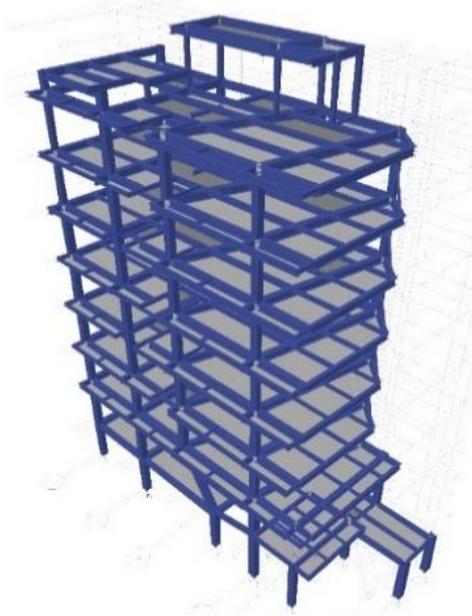
مشخصات کامل آورده شده است.

در جدول ۸، مقادیر زمان تناوب به دست آمده از رابطه (۷) و مقدار واقعی که از طریق مدل سازی در نرم افزار ایتبس ۱۶ (راستای طولی و عرضی به تفکیک) به دست آمده اند، و همچنین خطای مطلق که از قدر مطلق اختلاف زمان تناوب برآزش شده و واقعی حاصل می شود، نشان داده شده است. در جدول ۹، مقادیر زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد ۲۸۰۰ و مقدار واقعی که از طریق مدل سازی در نرم افزار ایتبس ۱۶ (راستای طولی و عرضی به تفکیک) به دست آمده اند، و همچنین خطای مطلق که از قدر مطلق اختلاف زمان تناوب ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ و واقعی حاصل می شود نشان داده شده است.

۶- صحت سنجی رابطه پیشنهادی با مدل های تحلیلی

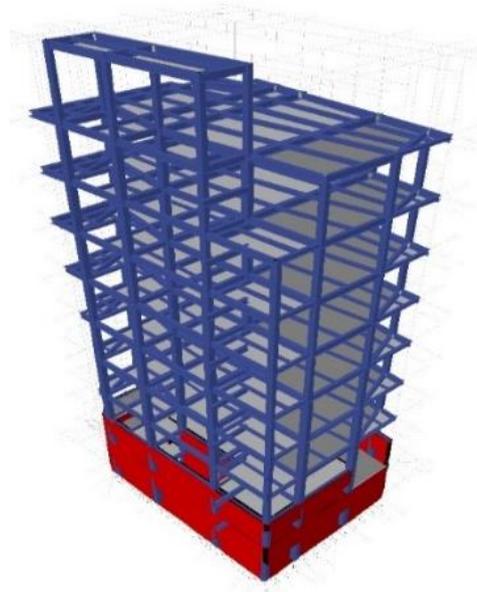
در این بخش، ۵ مدل سازه قاب خمشی فولادی واقع در شهر تهران و تیب ۲ خاک بستر (بر اساس تقسیم بندی استاندارد ۲۸۰۰) با در نظر گرفتن اثرات نامنظمی در پلان و ارتفاع و اندرکنش خاک و سازه در نرم افزار ایتبس ورژن ۲۰۱۶ [۲۳] مدل سازی شده است. در همین راستا از فنرهای معادل وینکلر^۱ برای مدل سازی استفاده شده است. برای هر مدل، کدی اختصاص داده شده است. به عنوان مثال MRF-IRPH-5 معرف قاب خمشی فولادی ۵ طبقه و دارای نامنظمی در ارتفاع و پلان، MRF-IRH-20 معرف قاب خمشی فولادی ۲۰ طبقه و دارای نامنظمی در ارتفاع، می باشد. در شکل های ۵ تا ۹ مدل سازی قاب های خمشی و همچنین در جدول ۱۱

1 Winkler



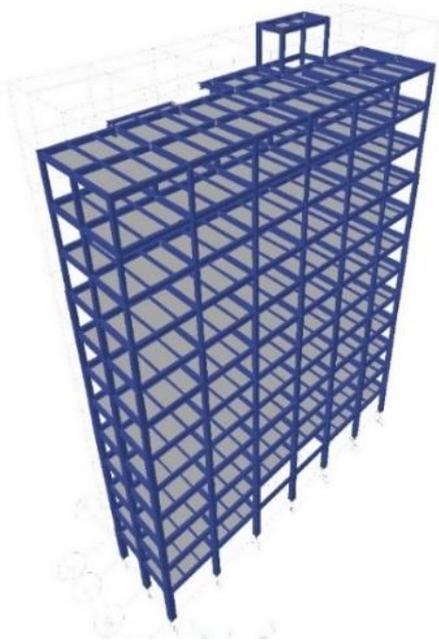
شکل ۶. مدل سازی قاب MRF-IRHP-10

Fig. 6. MRF-IRHP-10 frame model



شکل ۵. مدل سازی قاب MRF-IRP-10

Fig. 5. MRF-IRP-10 frame model



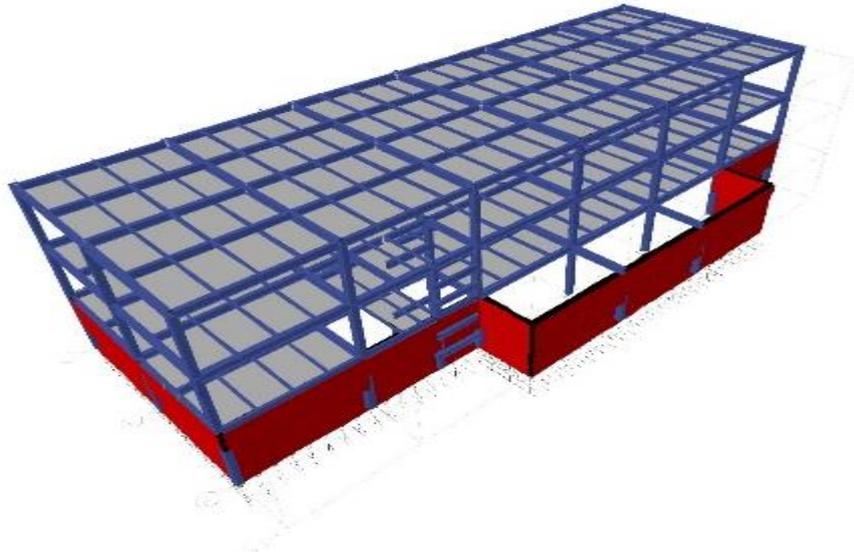
شکل ۸. مدل سازی قاب MRF-IRP-13

Fig. 8. MRF-IRP-13 frame model



شکل ۷. مدل سازی قاب MRF-IRP-14

Fig.7. MRF-IRP-14 frame model



شکل ۹. مدل سازی قاب MRF-IRP-3

Fig. 9. MRF-IRP-3 frame model

جدول ۷. اطلاعات ۵ مدل قاب خمشی فولادی

Table 7. Data of 5 steel moment frame models

شناسه سازه	MRF-IRP-10	MRF-IRHP-10	MRF-IRP-14	MRF-IRP-13	MRF-IRP-3
کاربری	مسکونی	مسکونی	مسکونی	اداری	آموزشی
تعداد طبقات	10	10	14	13	3
$H(m)$	38.76	33.1	51.15	47.55	18.7
h_{ave}/h_{max}	0.8	0.72	0.84	0.84	0.93
$(D_{ave}/D_{max})_x$	0.91	0.94	0.94	0.94	1
$(D_{ave}/D_{max})_y$	0.94	0.76	0.91	0.94	0.86
A_{ave}/A_{max}	0.82	0.73	0.44	0.78	0.78
V_{s30}/V_{max}	0.46	0.36	0.25	0.3	0.47
T_x (sec)	1.64	2	2.57	2.36	1
T_y (sec)	1.72	1.84	2.4	2.38	1

جدول ۸. مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه ۷ و زمان تناوب داده شده در «جدول ۷» (راستای طولی-عرضی)

Table 8. Comparison of the fundamental period obtained from Equation 7 and the fundamental period listed in "Table 7" (longitudinal-transverse direction)

شناسه سازه	H (m)	T_x (sec)	T_y (sec)	T_{ex} (sec)	T_{ey} (sec)	خطای مطلق (طولی) (ثانیه)	خطای مطلق (عرضی) (ثانیه)
MRF-IRP-10	38.76	1.64	1.72	1.59	1.57	0.05	0.15
MRF-IRHP-10	33.1	2.00	1.84	1.44	1.58	0.56	0.26
MRF-IRP-14	51.15	2.57	2.40	1.93	1.96	0.64	0.44
MRF-IRP-13	47.55	2.36	2.38	2.03	2.02	0.33	0.36
MRF-IRP-3	18.7	1.00	1.00	0.79	0.85	0.21	0.15

جدول ۹. مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد ۲۸۰۰ و زمان تناوب داده شده در «جدول ۷» (راستای طولی-عرضی)

Table 9. Comparison of the fundamental period obtained from 2800 seismic code and the fundamental period listed in "Table 7" (longitudinal-transverse direction)

شناسه سازه	H (m)	T_x (sec)	T_y (sec)	T_{2800} (sec)	خطای مطلق (طولی) (ثانیه)	خطای مطلق (عرضی) (ثانیه)
MRF-IRP-10	38.76	1.64	1.72	1.24	0.40	0.48
MRF-IRHP-10	33.1	2.00	1.84	1.10	0.90	0.74
MRF-IRP-14	51.15	2.57	2.40	1.53	1.04	0.87
MRF-IRP-13	47.55	2.36	2.38	1.45	0.91	0.93
MRF-IRP-3	18.7	1.00	1.00	0.72	0.28	0.28

۱۰ داده حاصل از مدل سازی برابر با ۰/۷۵، رابطه استاندارد ۲۸۰۰ برابر با ۰/۷، رابطه استاندارد ASCE7-16 برابر با ۰/۷۵ و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۷۳ می باشد.

جزر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای رابطه پیشنهادی به ازای ۱۰ داده حاصل از مدل سازی برابر با ۰/۳۶، رابطه استاندارد ۲۸۰۰ برابر با ۰/۷۴، رابطه استاندارد ASCE7-16 برابر با ۰/۶۳ و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۶۶ می باشد.

همانطور که مشاهده می شود، مقادیر ضریب تعیین (R^2) و ضریب تعیین تعدیل شده ($R^2_{adjusted}$) برای رابطه پیشنهادی نسبت به سه استاندارد ذکر شده بزرگ تر یا مساوی است. مقدار جزر میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز برای رابطه پیشنهادی نسبت به سه استاندارد ذکر شده کوچک تر است. از مقادیر موجود در جدول ۱۲ می توان نتیجه گرفت رابطه پیشنهادی تخمین مطلوبی دارند.

در جدول ۱۰، مقادیر زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد ASCE7-16 و مقدار واقعی که از طریق مدل سازی در نرم افزار ایتبس ۱۶ (راستای طولی و عرضی به تفکیک) به دست آمده اند و همچنین خطای مطلق که از قدر مطلق اختلاف زمان تناوب ارائه شده در استاندارد ASCE7-16 و واقعی حاصل می شود نشان داده شده است. در جدول ۱۱، مقادیر زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد UBC-97 و مقدار واقعی که از طریق مدل سازی در نرم افزار ایتبس ۱۶ (راستای طولی و عرضی به تفکیک) به دست آمده اند و همچنین خطای مطلق که از قدر مطلق اختلاف زمان تناوب ارائه شده در استاندارد UBC-97 و واقعی حاصل می شود نشان داده شده است.

در جدول ۱۲، ضریب تعیین (R^2) برای رابطه پیشنهادی به ازای ۱۰ داده حاصل از مدل سازی برابر با ۰/۹۱، رابطه استاندارد ۲۸۰۰، رابطه استاندارد ASCE7-16 و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۹ می باشند. ضریب تعیین تعدیل شده ($R^2_{adjusted}$) برای رابطه پیشنهادی به ازای

جدول ۱۰. مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد ASCE7-16 و زمان تناوب داده شده در «جدول ۷» (راستای طولی-عرضی)

Table 10. Comparison of the fundamental period obtained from ASCE7-16 seismic code and the fundamental period listed in "Table 7" (longitudinal-transverse direction)

شناسه سازه	H (m)	T_x (sec)	T_y (sec)	$T_{ASCE7-16}$ (sec)	خطای مطلق (طولی) (ثانیه)	خطای مطلق (عرضی) (ثانیه)
MRF-IRP-10	38.76	1.64	1.72	1.35	0.29	0.37
MRF-IRHP-10	33.1	2.00	1.84	1.19	0.81	0.65
MRF-IRP-14	51.15	2.57	2.40	1.69	0.88	0.71
MRF-IRP-13	47.55	2.36	2.38	1.59	0.77	0.79
MRF-IRP-3	18.7	1.00	1.00	0.75	0.25	0.25

جدول ۱۱. مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه استاندارد UBC-97 و زمان تناوب داده شده در «جدول ۷» (راستای طولی-عرضی)

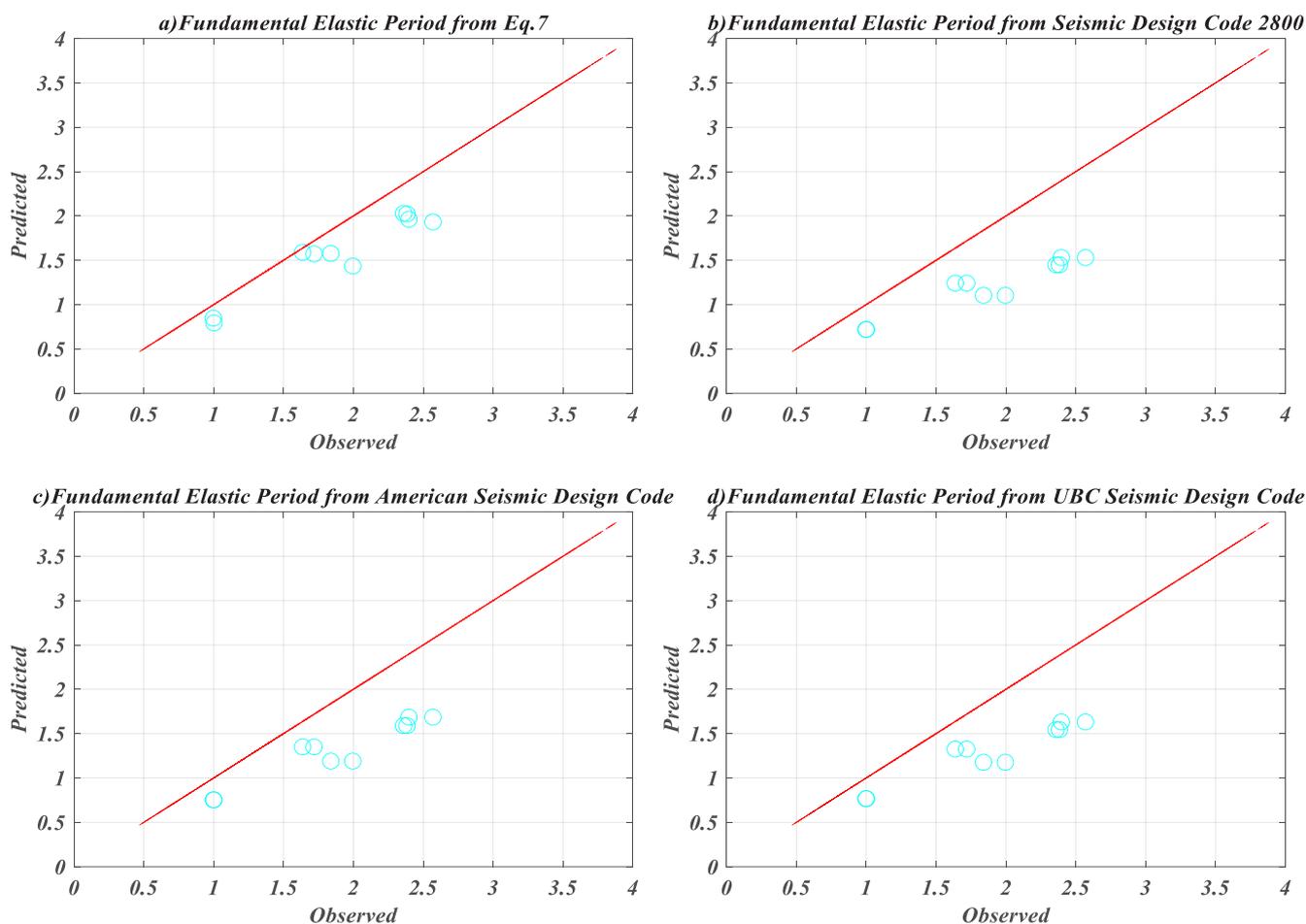
Table 11. Comparison of the fundamental period obtained from UBC-97 seismic code and the fundamental period listed in "Table 7" (longitudinal-transverse direction)

شناسه سازه	H (m)	T_x (sec)	T_y (sec)	T_{UBC-97} (sec)	خطای مطلق (طولی) (ثانیه)	خطای مطلق (عرضی) (ثانیه)
MRF-IRP-10	38.76	1.64	1.72	1.33	0.31	0.39
MRF-IRHP-10	33.1	2.00	1.84	1.18	0.82	0.66
MRF-IRP-14	51.15	2.57	2.40	1.63	0.94	0.77
MRF-IRP-13	47.55	2.36	2.38	1.54	0.82	0.84
MRF-IRP-3	18.7	1.00	1.00	0.77	0.23	0.23

جدول ۱۲. مقایسه نتایج ۱۰ داده مدل سازی (رابطه (۷)، استاندارد ۲۸۰۰، استاندارد ASCE7-16، استاندارد UBC-97)

Table 12. Comparison of 10 numerical results (Equation 7, Standard 2800, Standard ASCE7-16, Standard UBC-97)

	رابطه پیشنهادی	۲۸۰۰	ASCE7-16	UBC-97
R^2	0.91	0.9	0.9	0.9
$R^2_{adjusted}$	0.75	0.7	0.75	0.73
$RMSE$	0.36	0.74	0.63	0.66



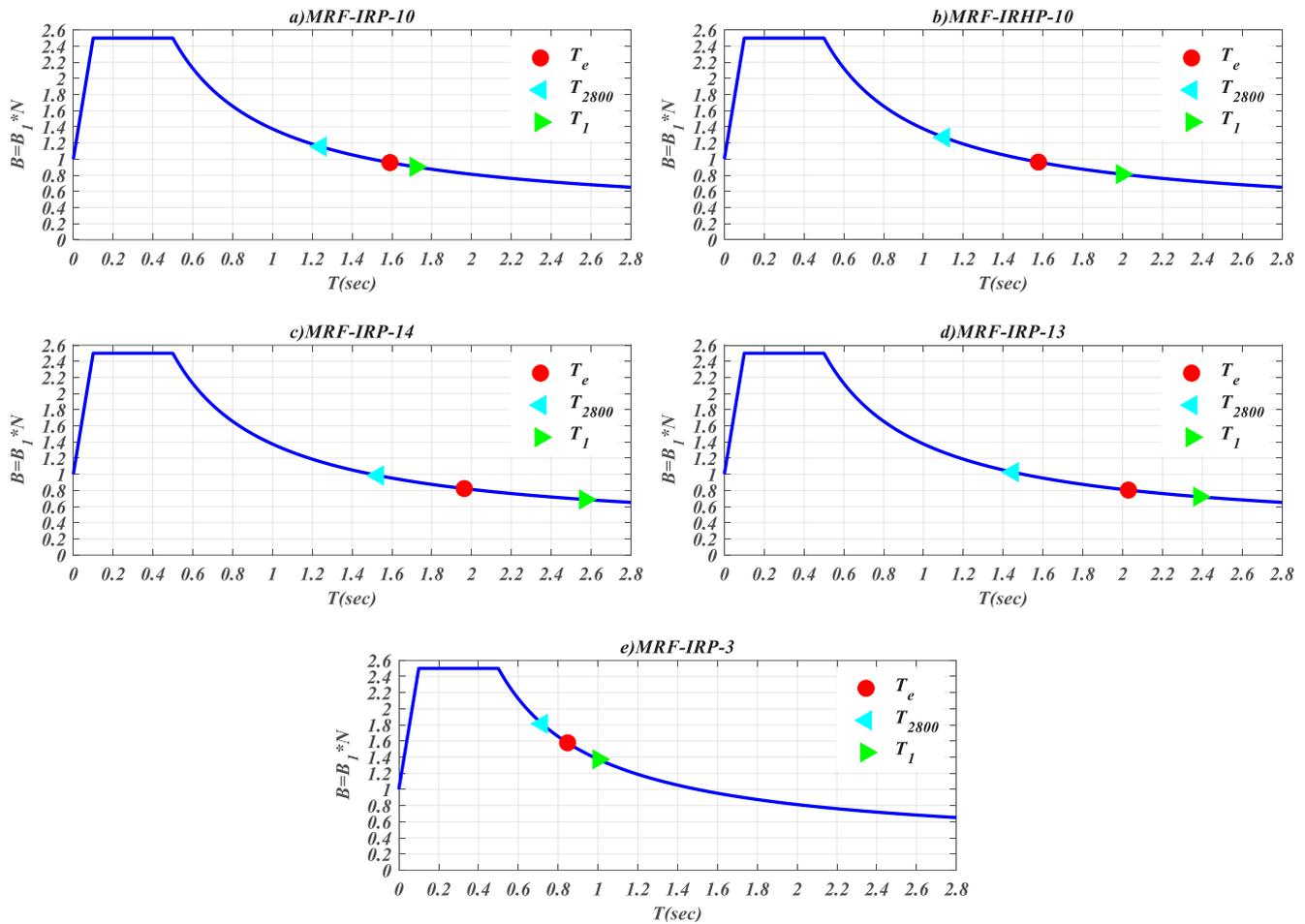
شکل ۱۰. نمودارهای مقایسه زمان تناوب به دست آمده از رابطه ۷ و استانداردهای ۲۸۰۰، ۷، ۲۸۰۰، ASCE7-16 و UBC-97

Fig. 10. Comparison of fundamental periods for numerical cases obtained from Equation 7, 2800, ASCE7-16 and UBC-97 seismic codes

۷- مقایسه نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی و استاندارد ۲۸۰۰ در طیف بازتاب ۲۸۰۰

شکل ۱۱، طیف بازتاب خاک تپ ۲ واقع در شهر تهران به ازای سطح خطر لرزه‌ای بسیار زیاد را به ازای ۵ مدل تحلیلی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار ضریب بازتاب به دست آمده به ازای زمان تناوب رابطه ۷ مقدار دقیق‌تری را نسبت به ضریب بازتاب به دست آمده به ازای زمان تناوب استاندارد ۲۸۰۰ می‌دهد. با دقیق‌تر شدن مقدار ضریب بازتاب در ناحیه نزولی طیف بازتاب، برش پایه کاهش می‌یابد و با کاهش برش پایه، سازه اقتصادی‌تر طراحی می‌شود.

شکل ۱۰- (a) مقادیر زمان تناوب برازش شده توسط رابطه پیشنهادی این مقاله و مقادیر زمان تناوب واقعی را نشان می‌دهد. (b) مقادیر زمان تناوب ارائه شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ و مقادیر زمان تناوب واقعی را نشان می‌دهد. (c) مقادیر زمان تناوب ارائه شده توسط استاندارد ASCE7-16 و مقادیر زمان تناوب واقعی را نشان می‌دهد. (d) مقادیر زمان تناوب ارائه شده توسط استاندارد UBC-97 و مقادیر زمان تناوب واقعی را نشان می‌دهد همان‌گونه که از این اشکال مشخص است، روابط پیشنهادی توسط استانداردهای ۲۸۰۰، ASCE7-16، UBC-97 علی‌الخصوص برای مقادیر زمان تناوب بالاتر از ۱/۵ ثانیه از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند و روابط پیشنهادی تخمین مطلوبی دارند.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه ضریب بازتاب به دست آمده به ازای زمان تناوب رابطه ۷ و استاندارد ۲۸۰۰

Fig. 11. Comparison diagram of the reflection coefficient obtained for the fundamental period of Equation 7 and the 2800 seismic code

با در نظر گرفتن اثرات نامنظمی و اندرکنش خاک و سازه ارائه گردیده است و سپس با مدل سازی پنج ساختمان قاب خمشی فولادی در نرم افزار ایتبس ۱۶، ۱۰ زمان تناوب تحلیلی حاصل در دو راستا با نتیجه رابطه پیشنهادی مقایسه شده است. روابط ارائه شده در استانداردهای ۲۸۰۰، ASCE7-16 و UBC-97 اثرات نامنظمی در پلان و ارتفاع سازه و اندرکنش خاک و سازه را در نظر نمی گیرند. نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی، با دقت خوبی، داده های تحلیلی را پوشش می دهد. نتایج ذیل نشان دهنده دقت رابطه پیشنهادی در مقایسه با روابط موجود آیین نامه ای می باشد:

۱- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای آموزش رابطه پیشنهادی

به ازای ۴۵ بانک داده میدانی برابر با ۰/۲، تست رابطه پیشنهادی برابر با ۰/۱۸، رابطه استاندارد ۲۸۰۰ برابر با ۰/۶۲، رابطه استاندارد ASCE7-16

در جداول ۱۳ و ۱۴، مقادیر ضریب بازتاب به دست آمده به ازای زمان تناوب رابطه (۷)، استاندارد ۲۸۰۰، نتایج تحلیل مدل سازی و همچنین درصد اختلاف ضرایب بازتاب به دست آمده نسبت به زمان تناوب تحلیلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد، درصد اختلاف به ازای زمان تناوب رابطه پیشنهادی از رابطه استاندارد ۲۸۰۰ کمتر می باشد. از مقادیر موجود در جداول ۱۳ و ۱۴ نیز می توان نتیجه گرفت رابطه پیشنهادی تخمین مطلوبی دارند.

۸- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله، با استفاده از پایگاهی متشکل از ۴۵ داده میدانی زمان تناوب طبیعی قاب های خمشی فولادی، رابطه ای جهت تخمین زمان تناوب طبیعی

جدول ۱۳. مقایسه نتایج ضریب بازتاب ۱۰ داده مدل‌سازی با رابطه ۷

Table 13. Comparison of the reflection coefficient for 10 numerical data with equation 7

شناسه سازه	ضریب بازتاب با استفاده از زمان تناوب طبیعی سازه	ضریب بازتاب با استفاده از رابطه ۷	درصد اختلاف نسبی ضرایب بازتاب (%)
MRF-IRP-10	0.91	0.96	5.83
MRF-IRHP-10	0.81	0.96	18.39
MRF-IRP-14	0.69	0.82	19.65
MRF-IRP-13	0.72	0.80	11.41
MRF-IRP-3	1.37	1.58	14.87

جدول ۱۴. مقایسه نتایج ضریب بازتاب ۱۰ داده مدل‌سازی با استاندارد ۲۸۰۰

Table 14. Comparison of reflection coefficient results of 10 numerical data with 2800 seismic code

شناسه سازه	ضریب بازتاب با استفاده از زمان تناوب طبیعی سازه	ضریب بازتاب با استفاده از استاندارد ۲۸۰۰	درصد اختلاف نسبی ضرایب بازتاب (%)
MRF-IRP-10	0.91	1.16	27.7
MRF-IRHP-10	0.81	1.27	55.95
MRF-IRP-14	0.69	0.99	43.23
MRF-IRP-13	0.72	1.03	42.17
MRF-IRP-3	1.37	1.81	32.09

۶- ضریب تعیین تعدیل شده ($R^2_{adjusted}$) برای رابطه پیشنهادی به ازای ۱۰ داده حاصل از مدل‌سازی برابر با ۰/۷۵، رابطه استاندارد ۲۸۰۰ برابر با ۰/۷، رابطه استاندارد ASCE7-16 برابر با ۰/۷۵ و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۷۳ می‌باشد.

با توجه به طیف بازتاب در استاندارد ۲۸۰۰، در ناحیه شتاب ثابت (که سازه‌های قاب خمشی فولادی با ارتفاع کم) قرار دارند، اختلاف در مقدار زمان تناوب، تاثیری در مقدار برش پایه ندارد. لذا برای سازه‌هایی با ارتفاع کم، دقت فرمول تجربی نیاز نیست. اما در سازه‌های قاب خمشی فولادی با ارتفاع متوسط و یا زیاد که در ناحیه نزولی طیف بازتاب قرار می‌گیرند (شکل ۱۰)، تغییر در مقدار زمان تناوب می‌تواند تاثیر به‌سزایی در مقدار برش پایه نهایی داشته باشد. برای مثال مدل MRF-IRP-10، اختلاف ضریب بازتاب به دست آمده به ازای زمان تناوب رابطه ۷ و زمان تناوب تحلیلی آن برابر ۵/۸۳ درصد در حالی که این اختلاف برای رابطه استاندارد ۲۸۰۰ برابر ۲۷/۷ درصد می‌باشد. لذا استفاده از رابطه پیشنهادی در این مقاله برای تخمین زمان تناوب تجربی، برای سازه‌های با ارتفاع متوسط و زیاد می‌تواند بهبود قابل توجهی در دقت تخمین مقدار برش پایه نهایی داشته باشد.

برابر با ۰/۵ و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۵۴ می‌باشد.

۲- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای رابطه پیشنهادی به ازای ۱۰ داده حاصل از مدل‌سازی برابر با ۰/۳۶، رابطه استاندارد ۲۸۰۰ برابر با ۰/۷۴، رابطه استاندارد ASCE7-16 برابر با ۰/۶۳ و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۶۶ می‌باشد.

۳- ضریب تعیین (R^2) برای آموزش رابطه پیشنهادی به ازای ۴۵ بانک داده میدانی برابر با ۰/۹۶، تست رابطه پیشنهادی، رابطه استاندارد ۲۸۰۰، رابطه استاندارد ASCE7-16 و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۹۵ می‌باشد.

۴- ضریب تعیین (R^2) برای رابطه پیشنهادی به ازای ۱۰ داده حاصل از مدل‌سازی برابر با ۰/۹۱، رابطه استاندارد ۲۸۰۰، رابطه استاندارد ASCE7-16 و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۹ می‌باشد.

۵- ضریب تعیین تعدیل شده ($R^2_{adjusted}$) برای آموزش رابطه پیشنهادی به ازای ۴۵ بانک داده میدانی برابر با ۰/۹۵، تست رابطه پیشنهادی برابر با ۰/۸۶، رابطه استاندارد ۲۸۰۰ برابر با ۰/۷۹، رابطه استاندارد ASCE7-16 برابر با ۰/۸۶ و رابطه استاندارد UBC-97 برابر با ۰/۸۲ می‌باشد.

- Department of Conservation, Sacramento, (1992) 6-1.
- [12] A. La Tegala, W. Mera, Theoretical and Experimental Analysis to Define a Simplified Formula for the Determination of the First Period of Vibration of R/C and Steel Buildings, Proceeding of the 7th Conference of the Canadian Association for Earthquake Engineering, Montreal, Canada, (1995).
- [13] R. K. Goel, A. K. Chopra, Evaluation of code formulas for fundamental period of buildings, Proceeding of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd, Oxford, England, (1127) (1996).
- [14] R. K. Goel, A. K. Chopra, Vibration properties of buildings determined from recorded earthquake motions, Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, 1997.
- [15] L. L. Hong, W. L. Hwang, Empirical formula for fundamental vibration periods of reinforced concrete buildings in Taiwan, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29(3) (2000) 327-337.
- [16] P. Sarkar, A. M. Prasad, D. Menon, Vertical geometric irregularity in stepped building frames, Engineering Structures, 32(8) (2010) 2175-2182.
- [17] M. A. Namjooyan, M. R. Karimian, H. Barslani, R. Rahgozar, Presenting a new relationship in estimating the experimental period of steel moment frame, Journal, (1393) (in Persian).
- [18] K. Young, H. Adeli, Fundamental period of irregular moment-resisting steel frame structures, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 23(15) (2014) 1141-1157.
- [19] ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures, in, American Society of Civil Engineers, 2016.
- [20] J. Stewart, C. B. Crouse, T. Hutchinson, B. Lizundia, F. Naeim, F. Ostadan, Soil-Structure Interaction for Building Structures, Grant/Contract Reports (NISTGCR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2012.
- [1] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800-87, 1st ed., Building and Housing Research Center, Tehran, Iran, 1987.
- [2] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800-99, 2nd ed., Building and Housing Research Center, Tehran, Iran, 1999.
- [3] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800-05, 3rd ed., Building and Housing Research Center, Tehran, Iran, 2005.
- [4] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800-14, 4th ed., Building and Housing Research Center, Tehran, Iran, 2014.
- [5] Uniform Building Code, U. B. C., International conference of building officials, Whittier, CA, (1997).
- [6] M. Takeuchi, K. Nakagawa, Vibrational characteristics of Buildings, Proceeding of the Second World Conference on Earthquake Engineering, 2 (1960) 978.
- [7] A. Aytun, Experimental Determination of Natural Vibration Periods of Structures, in: Symposium on Earthquake Engineering and Earthquake Related Problems in Turkey, 1972, pp. 2-5.
- [8] F. Udawadia, M. Trifunac, Ambient vibration tests of full scale structures, in: Proceeding of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, 1973, pp. 135-142.
- [9] G. C. Hart, R. M. DiJulio Jr, M. Lew, Torsional response of high-rise buildings, Journal of the Structural Division, 101(2) (1975) 397-416.
- [10] V. V. Bertero, Fundamental period of reinforced concrete moment-resisting frame structures, John A. Blume Earthquake Engineering Center, 1988.
- [11] E. E. Cole, C. V. Tokas, J. F. Meehan, Analysis of recorded building data to verify or improve 1991 Uniform Building Code (UBC) period of vibration formulas, Proceedings of SMIP92, Strong Motion Instrumentation Program, Divisions of Mines Geology, California

- laws from experimental data, Science, 324(5923) (2009) 81-85.
- [23] Computers and Structures Inc. 2016. ETABS Nonlinear Version 16.2.1. Walnut Creek, CA, USA.
- [21] USGS. 2011. Center for Engineering Strong Motion Data. Retrieved August 2011, from <http://strongmotioncenter.org/>. in.
- [22] M. Schmidt, H. Lipson, Distilling free-form natural

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. J. Hamidia , F. Nejabati , Predictive equations for fundamental period of steel moment frames considering the effects of irregularity in the floor plan and height and soil-structure interaction, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 2281-2302.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20426.7421



